

УДК 621.9

**В.Е. КАРПУСЬ**, д-р техн. наук, **В.А. ИВАНОВ**, НТУ «ХПИ», Харьков**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УСТАНОВОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ**

*У статті розглянуто вибір діаметрів регульованих опор в залежності від ваги заготовки. Визначено максимально допустимі навантаження на одну регульовану опору. Виконано порівняння точності обробки поверхонь у збірному та переналагоджуваному установочно-зажимних пристроях при свердлінні, розточуванні та фрезеруванні.*

*This article describes the adjustable support diameter choice against workpiece weight. The maximal allowable load on the one adjustable support is defined. The comparison of machining accuracy in the assemblage locate-and-clamp fixtures and reusable one when drilling, boring and milling is performed.*

Точность обработки деталей на станках с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточной группы и многоцелевых станках в значительной степени зависит от точности установки заготовок в установочно-зажимных приспособлениях (УЗП). Установка корпусных деталей (КД) в УЗП осуществляется по трем основным схемам базирования, которые составляют 76% от всех применяемых схем базирования (рис. 1). Это базирование по трем взаимно перпендикулярным плоскостям; по двум плоскостям и отверстию; по плоскости и двум отверстиям. Особенностью этих схем базирования является то, что одна из плоских поверхностей используется как установочная база.

Выбор необходимой схемы базирования зависит от формы заготовки, расположения базовых и обрабатываемых поверхностей. Установочной поверхностью заготовка устанавливается, как правило, на точечные опоры, которые могут быть постоянными или регулируемыми. Рекомендации по выбору опор в зависимости от состояния базовой поверхности приведена во многих источниках [1-5], имеются также данные о предельных нагрузках на постоянные опоры [4, 5], однако информация относительно выбора диаметра опор в зависимости от массы заготовки в научной литературе отсутствует. Современное производство характеризуется частой сменой номенклатуры обрабатываемых деталей, поэтому целесообразно рассмотреть регулируемые опоры, которые могут переналаживаться для установки аналогичных по форме, но с другими размерами заготовок. В результате анализа корпусных деталей можно сделать вывод, что 85% деталей (рис. 2), обрабатываемых на станках с ЧПУ, имеют габаритные размеры 500x500 мм [6]. Диаграмма распределения трудоемкости обработки корпусных деталей (рис. 3) показывает, что основными видами обработки КД являются сверление, зенкерование, растачивание и фрезерование, которые составляют 80% от общей трудоемкости обработки деталей [6].

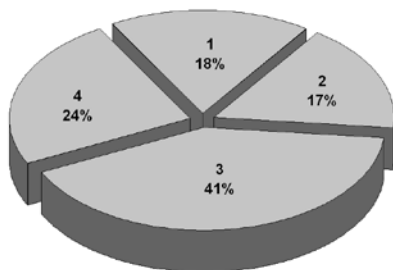


Рис. 1. Диаграмма распределения корпусных деталей в зависимости от схем базирования в УЗП: 1 – по трем взаимно перпендикулярным плоскостям; 2 – по двум плоскостям и отверстию; 3 – по плоскости и двум отверстиям; 4 – остальные

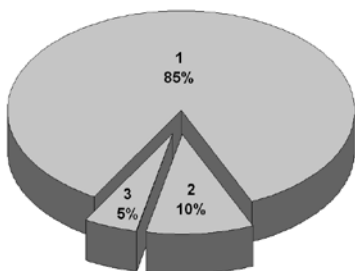


Рис. 2. Диаграмма распределения корпусных деталей по габаритным размерам: 1 – до 500x500 мм; 2 – от 500x500 до 1000x1000 мм; 3 – более 1000x1000 мм

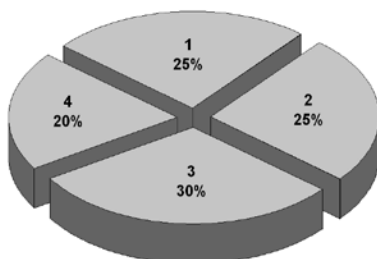


Рис. 3. Диаграмма распределения видов обработки корпусных деталей по трудоемкости: 1 – сверление; 2 – зенкерование и растачивание; 3 – фрезерование; 4 – другие

В статье рассмотрен выбор диаметров регулируемых опор в зависимости от массы заготовки, определена максимально допустимая нагрузка на одну регулируемую опору и выполнено сравнение точности обработки заготовки в сборном и переналаживаемом УЗП при сверлении и растачивании отверстий, а также при фрезеровании наружных поверхностей.

Современные программные продукты позволяют осуществлять 3D-моделирование элементов приспособлений и выполнять их расчет по методу конечных элементов (МКЭ) на этапе проектирования компоновки УЗП, что позволяет конструктору оценить прочностные характеристики изделия в целом и для каждого элемента отдельно, а также обоснованно применить тот или иной конструктивный элемент в конструкции УЗП для обеспечения заданных технических требований.

В системе пространственного моделирования SolidWorks нами выполнены 3D-модели винтовых регулируемых опор (рис. 4, а). Далее с использованием модуля конечно-элементного анализа COSMOSWorks выполнялось моделирование закрепления и нагружения опоры (рис. 4, б) подобно установке регулируемой опоры по резьбе в корпус приспособления, и произведен расчет по МКЭ. На рис. 5 представлены диаграммы напряженно-деформированного состояния и перемещений для одного из диаметров опор при нагружении.

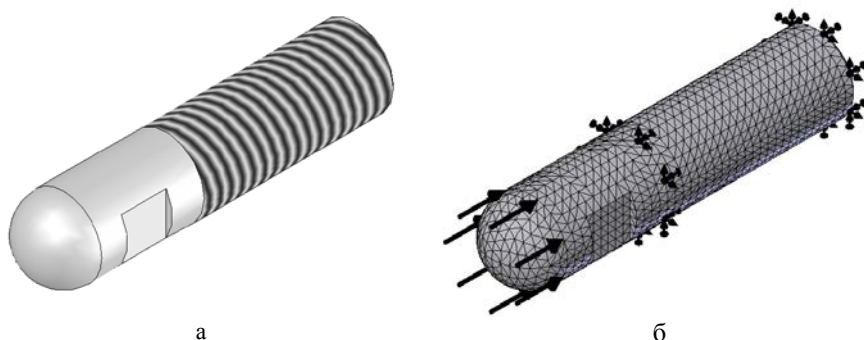


Рис. 4. Твёрдотельная модель (а) и сетка конечных элементов с приложенной нагрузкой и граничными условиями (б) винтовой регулируемой опоры

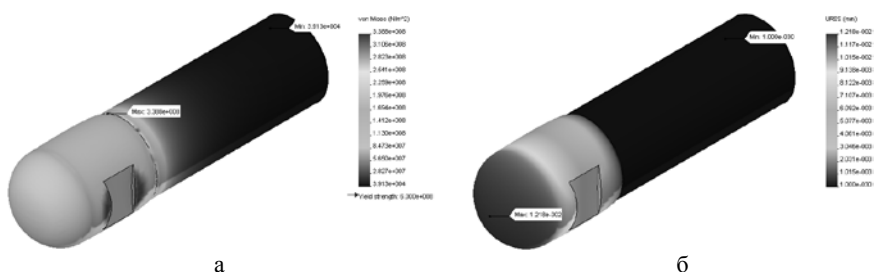


Рис. 5. Диаграммы напряженно-деформированного состояния (а) и перемещений (б) винтовой регулируемой опоры диаметром 12 мм

Анализируя диаграмму напряженно-деформированного состояния, можно сделать вывод, что наиболее нагруженным является участок, где цилиндрическая поверхность переходит в резьбовую. Именно в этом месте наблюдается максимальное значение напряжений по критерию Мизеса (см. рис. 5, а). Диаграмма перемещений отображает величину перемещений опоры по отношению к первоначальному положению до приложения нагрузки. Очевидно, что наибольшая величина перемещений будет соответствовать точке, в которой контактируют заготовка и опора (см. рис. 5, б). При расчете принималось, что допустимое значение запаса прочности опор равно 2,5 [7].

Результаты расчета винтовых регулируемых опор сведены в табл. 1.

На опоры воздействуют вес заготовки, силы резания, действующие при механической обработке, а также величина усилия зажима, обеспечивающая неизменное положение заготовки в процессе формообразования. Например, три опоры диаметром 12 мм могут воспринимать максимальную нагрузку 39,6 кН. Таким образом, сумма указанных величин не должна превышать расчетное значение 39,6 кН.

Таблица 1

Диаметр регулируемой опоры, мм	6	8	10	12	16
Предельная нагрузка на одну опору, кН	до 3,1	3,1...5,8	5,8...11,0	11,0...13,2	13,2...21,3
Максимальные эквивалентные напряжения по критерию Мизеса (von Mises), Н/м <sup>2</sup>	$3,41 \cdot 10^8$	$3,39 \cdot 10^8$	$3,37 \cdot 10^8$	$3,39 \cdot 10^8$	$3,41 \cdot 10^8$
Максимальная величина перемещения, мм	$5,73 \cdot 10^{-3}$	$8,27 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$1,39 \cdot 10^{-2}$

Известно, что сначала выбирается компоновка УЗП, а затем назначается режим резания и необходимая величина усилия зажима. Поэтому после назначения режима резания следует уточнить принятый диаметр опор в соответствии с полученными расчетными величинами. В идеальном варианте, когда вес заготовки равномерно распределен между тремя опорами, а центр масс заготовки находится в центре опорного треугольника и обрабатываемая поверхность не выходит за его границы, допустимую нагрузку на одну опору  $[F_{on}]$  можно определить по формуле:

$$[F_{on}] \geq \frac{P_{заг} + F_{рез} + F_{заж}}{3},$$

где  $P_{заг}$  – вес обрабатываемой заготовки, Н;

$F_{рез}$  – расчетная величина силы резания, Н;

$F_{заж}$  – расчетная величина усилия зажима, Н.

Однако часто необходимо обработать несимметричную заготовку, у которой центр масс смещен в одну из сторон, или заготовку, у которой обработке подлежит только одна из сторон, т.е. выполняется несимметричная или многоинструментная обработка (например, применение многошпиндельной головки для сверления нескольких отверстий) и т.д. Поэтому необходимо индивидуально подходить к выбору УЭ в компоновке УЗП, учитывая все факторы, влияющие на опоры в процессе механической обработки и согласовывать расчетные величины с данными таблицы 1.

Рассмотрим два варианта сверления нескольких отверстий диаметром 20 мм на глубину 30 мм.

а) в несимметричной заготовке коробчатой формы из чугуна массой 50 кг поочередно сверлятся два отверстия, одно из которых находится в пределах опорного треугольника, а другое – вне опорного треугольника;

б) в такой же заготовке с применением многошпиндельной головки сверлятся четыре отверстия, расположенные на одной окружности и четыре отверстия, расположенные в линию.

Аналитически по МКЭ сравним точность обработки отверстий для обоих вариантов применительно к двум системам приспособлений. Вариант 1 – регулируемые опоры, ввинченные в базовую плиту сборно-разборного приспособления (СПП) (рис. 6), вариант 2 – регулируемые опоры, установленные в базирующем переналаживаемом модуле (рис. 7), которые с помощью механизма регулирования могут изменять свое положение в пределах заданной траектории.

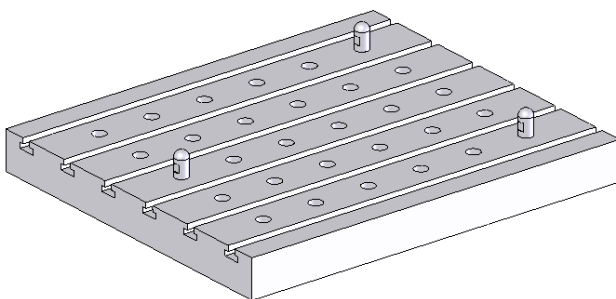


Рис. 6. Базовая плита СПП с регулируемыми опорами

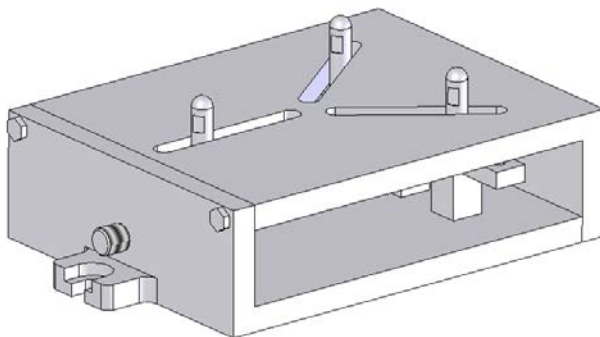


Рис. 7. Базирующий переналаживаемый модуль

По нормативам [8] назначен следующий режим сверления отверстий сверлами, оснащенными твердым сплавом ВК8: подача  $S_0=0,47$  мм/об, ско-

рость резания  $V=63$  м/мин. При этом частота вращения сверла 1000 об/мин, крутящий момент равен 28,7 Н·м, осевая сила резания 5300 Н, мощность резания 2,87 кВт.

На 3D-модели обрабатываемой заготовки произвольно назначаем координаты двух отверстий: одного в пределах опорного треугольника, а другого – вне его. Чтобы определить напряжения и величины перемещений в зоне контакта УЭ и заготовки. После установки заготовки на УЭ и приложения усилия зажима между заготовкой и опорами возникают контактные деформации, в результате которых сминаются микронеровности на обрабатываемой заготовке. Под действием сил резания появляются упругие деформации. Численные значения максимальных напряжений и величин перемещений для рассматриваемых СРП и базирующего модуля представлены в табл. 2.

Таблица 2

Определяемый параметр	Установочно-зажимное приспособление	Одноинструментная обработка		Многоинструментная обработка	
		Отверстие в пределах опорного треугольника	Отверстие вне пределов опорного треугольника	Отверстия расположены по окружности	Отверстия расположены в линию
Максимальные эквивалентные напряжения по критерию Мизеса (von Mises), Н/м <sup>2</sup>	СРП	$1,41 \cdot 10^8$	$2,43 \cdot 10^8$	$3,96 \cdot 10^8$	$4,85 \cdot 10^8$
	Базирующий модуль	$0,89 \cdot 10^8$	$1,38 \cdot 10^8$	$2,74 \cdot 10^8$	$4,87 \cdot 10^8$
Максимальная величина перемещения, мм	СРП	$7,703 \cdot 10^{-3}$	$1,337 \cdot 10^{-2}$	$1,929 \cdot 10^{-2}$	$2,404 \cdot 10^{-2}$
	Базирующий модуль	$1,007 \cdot 10^{-2}$	$1,996 \cdot 10^{-2}$	$2,818 \cdot 10^{-2}$	$3,034 \cdot 10^{-2}$

При сверлении отверстия за пределами опорного треугольника напряжения распределяются неравномерно, наибольшие значения концентрируются вблизи наиболее нагруженных элементов – опор и, следовательно, в них возникают большие величины перемещений, чем при сверлении отверстия, расположенного в пределах опорного треугольника.

При обработке многошпиндельными головками напряжения по критерию Мизеса и величины перемещений значительно выше, чем при одноинструментной обработке. Если сравнивать конструктивное исполнение многошпиндельных головок, то напряжения будут меньше при обработке отверстий, расположенных по окружности.

Для сравнения показателей выбранных систем УЗП при растачивании рассмотрим обработку основных отверстий в такой же заготовке. К основным отверстиям предъявляются высокие требования по геометрической точности и точности их расположения относительно других отверстий и технологических баз. 80% диаметров основных отверстий в КД находятся в пределах 120 мм [7]. Для моделирования и расчета по МКЭ выбираем диаметр растачиваемых отверстий 50 мм, причем одно из них находится внутри опорного треугольника, а другое – вне его.

В качестве режущего инструмента выбрана расточная оправка с резцом из твердого сплава ВК6. Преимуществом расточных оправок является простота и универсальность конструкции. По нормативам [8] назначен следующий режим растачивания отверстий: подача 0,2 мм/об, скорость резания 126 м/мин. При этом частота вращения расточной оправки 800 об/мин, составляющая  $P_z$  силы резания равна 350 Н, составляющая  $P_y=260$  Н.

Результаты расчета (табл. 3) позволяют сделать вывод, что величины перемещений в рассматриваемых системах УЗП сопоставимы.

Таблица 3

Определяемый параметр	Установочно-зажимное приспособление	Отверстие в пределах опорного треугольника	Отверстие вне пределов опорного треугольника
Максимальные эквивалентные напряжения по критерию Мизеса (von Mises), Н/м <sup>2</sup>	СРП	$2,13 \cdot 10^7$	$2,58 \cdot 10^7$
	Базирующий модуль	$1,71 \cdot 10^7$	$1,98 \cdot 10^7$
Максимальная величина перемещения, мм	СРП	$1,121 \cdot 10^{-3}$	$1,352 \cdot 10^{-3}$
	Базирующий модуль	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$1,718 \cdot 10^{-3}$

Фрезерование, обеспечивающее высокопроизводительную обработку, является наиболее распространенным видом обработки наружных поверхностей КД. Нами рассмотрено фрезерование плоскости шириной 160 мм. В соответствии с рекомендациями [8] выбрана торцовая фреза диаметром 200 мм с числом зубьев 20 и механическим креплением пластин из твердого сплава ВК6, и назначен следующий режим фрезерования: глубина резания 3 мм, подача на зуб фрезы  $S_z=0,13$  мм/зуб, скорость резания  $V=157$  м/мин. Частота вращения фрезы  $n=250$  об/мин, крутящий момент  $M_{кр}=242$  Н·м, сила резания  $P_z=242$  Н. В табл. 4 представлены результаты расчета точности положения регулируемых опор УЗП при фрезеровании.

Как видим, при фрезеровании максимальные эквивалентные напряжения по критерию Мизеса ниже при обработке поверхностей заготовок в сборном

УЗП, что обеспечивает меньшие величины перемещений установочных элементов.

Таблица 4

Определяемый параметр	Установочно-зажимное приспособление	
	СРП	Базирующий модуль
Максимальные эквивалентные напряжения по критерию Мизеса (von Mises), Н/м <sup>2</sup>	$1,13 \cdot 10^7$	$1,71 \cdot 10^7$
Максимальная величина перемещения, мм	$1,028 \cdot 10^{-3}$	$1,394 \cdot 10^{-3}$

Величины перемещений опор, которые определяют точность обработки поверхностей, практически одинаковые при сравнении рассматриваемых УЗП при сверлении, растачивании и фрезеровании поверхностей деталей.

### Выводы:

1. Диаметр регулируемых опор выбирается в зависимости от величины предельной нагрузки на одну опору, которая учитывает вес обрабатываемой заготовки, а также величины сил резания и усилий зажима.

2. Необходимая точность обработки заготовки определяет выбор компоновки УЗП. При установке заготовок необходимо стремиться к тому, чтобы обрабатываемые поверхности находились в пределах опорного треугольника.

**Список литературы:** 1. Черпаков Б.И. Технологическая оснастка: Учебник для учреждений сред. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 288 с. 2. Станочные приспособления/ В.А. Богуслаев, В.А. Леховицер, А.С. Смирнов. – Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2000. – 461с. 3. Белоусов А.П. Проектирование станочных приспособлений: Учеб. пособие для техникумов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1974. – 263 с. 4. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 277 с. 5. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т./ Под ред. Б.Н. Вардашкина, А.А. Шатилова. – М.: Машиностроение, 1984. – Т.1. – 592 с. 6. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС/ И.Л. Фадюшин, Я.А. Музыкант, А.И. Мещеряков и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с. 7. Киркач Н.Ф., Баласанян Р.А. Расчет и проектирование деталей машин: Учеб. пособие для техн. вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Харьков: Основа, 1991. – 276 с. 8. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть 2. Нормативы режимов резания. – М.: Экономика, 1990. – 471 с.

*Поступила в редакцию 01.03.08*